

模糊聚类分析在色木孔洞缺陷位置声波检测中的应用

郭 瑞,马肖祥,邢 涛*,孟宪静

(东北林业大学 工程技术学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:为了实现木材孔洞缺陷位置的检测,提出了一种基于模糊聚类分析的新型木材声波无损检测方法。针对端部孔、无孔洞和中间孔木材试件,运用敲击法采集木材声波信号,提取时频特征向量作为样本数据,运用基于传递闭包的模糊相似矩阵对训练样本进行聚类分析,建立不同类别的模糊模式库,采用最大隶属度原则对待测样本进行识别。结果表明:此方法克服了模糊聚类单一分析方法的不确定性,实现了多指标定量化的检测;该方法能够有效地对色木孔洞缺陷位置进行检测,且准确率较高,检测端部孔样本的准确率为 84%,无孔洞样本准确率为 94%,中间孔样本准确率为 92%。

关键词:模糊模式识别;木材声波;无损检测;模糊聚类

中图分类号:S781.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)04-0251-06

Application of Fuzzy Cluster Analysis on Diagnosing the Hole Defects in *Acer mono* Wood Using Acoustic Testing

GUO Rui, MA Xiao-xiang, XING Tao*, MENG Xian-jing

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: In order to achieve the non-destructive detection of wood hole defects, a new method based on fuzzy clustering analysis of wood acoustic was developed. Acoustic signals of the wood specimen with the hole defects at the end and in the middle as well as without hole defects were collected by percussion method. Time-frequency feature vectors were extracted as the sample data, and the fuzzy similar matrix based on the transitive closure was imposed to the cluster analysis for the training samples to create different classes of fuzzy pattern a maximum degree principle to identify the test samples was adopted. Experimental results showed that this method overcame the uncertainty of the fuzzy clustering single analysis, achieved a multi-index quantitative detection. The method could effectively detect the position of the hole defects in *Acer mono* wood with high accuracy, 84% for the wood the hole defects at the end, 94% for the wood without defects, 92% for the wood with hole defects in the middle.

Key words: fuzzy pattern recognition; wood acoustic; nondestructive testing; fuzzy cluster

科学准确地对木材表面及内部的缺陷进行无损检测,是提高材料的利用水平,避免因分等不准造成材料超值使用带来事故隐患的关键^[1]。近年来,利用结构的振动及声辐射特性对一些食品或材料进行损伤检测一直受到许多研究者的关注^[2]。B. Neled^[3]等利用分析敲击振动得到水果的声辐射特

性,从而判定水果的品质与成熟度;B. Diezma-Iglesias^[4]等基于声音脉冲响应的方法研究检测西瓜的凹缝、衰败、碰撞等内部缺陷;H. K. Cho^[5-6]等研究了影响鸡蛋声音特性的因素,得出了适合蛋壳检测的优化参数,随后利用鸡蛋的声脉冲频率特性,研制出蛋壳裂纹检测仪,提高了裂纹检测精度。木材无

收稿日期:2014-09-11 修回日期:2014-12-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金支撑项目(DL11CB02);国家自然科学基金支撑项目(41171274);中国博士后科学基金支撑项目(2011M500036)。

作者简介:郭瑞,男,在读硕士,研究方向:木材无损检测。E-mail:bujigr@163.com

*通信作者:邢涛,男,副教授,研究方向:木材无损检测、超声波探伤、激光雷达测量。E-mail:xt_hit@126.com

损检测的方法最常见的有应力波检测、超声波检测和 X 线检测 3 种^[7],与这 3 种木材无损检测方法相比,声辐射检测方法具有检测快速、操作简单方便优点。但目前有关利用木材结构的声辐射特性进行木材损伤检测的研究还鲜有报道。模糊模式识别在无损检测方面有着广泛的应用,如,王宇^[8]提出用基于双谱特征的分析提取和抑制式模糊 C-均值聚类算法的模糊模式识别方法对管材缺陷进行检测。谭冬梅和瞿伟廉^[9]提出基于提升小波包特征提取,利用模糊 C-均值聚类分析与择近原则相结合的模糊模式识别方法对结构进行损伤识别。模糊模式识别技术算法简易灵巧,分类过程易于理解,透明度高。将模糊模式识别应用于木材无损检测领域的研究还少之又少。

本研究采用敲击法对有、无孔洞缺陷木材试件声波信号进行采集,关于敲击检测机理的研究始于 Cawley 和 Adams 在复合材料探伤方面的工作^[10]。他们认为声音是结构的总体响应,木材结构一旦出

现损伤则会导致木材结构和强度发生变化,致使其声辐射特性和共振频率发生变化^[11-12],因此根据木材声波的时域特性和频域特性来辨识结构的损伤。通过分析木材试件的时频特性,提取出时频特征向量作为样本数据,运用基于传递闭包的模糊相似矩阵对训练样本进行聚类分析,建立不同类别的模糊模式库,采用“最大隶属度”原则对待测样本进行识别,建立了高精度的检测模型。

1 木材无损检测模糊模式识别模型

日常生活中有很多成功的损伤检测例子,比如铁路工人用敲击法来检查钢轨或车轮中是否有裂缝;建筑工人用小锤敲击地砖以检查是否存在空洞;地质勘查工人通过声波可以判断地质内部结构等^[13-14]。实践证明这些检测方法都是有效的,但检测员只是根据声音,凭经验来判断损伤情况,缺少定量的分析。为此提出通过建立模糊模式识别模型来分析检测木材损伤(图 1)。

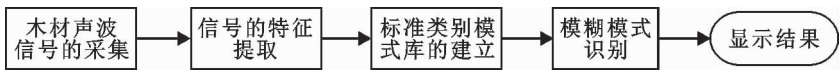


图 1 木材声波无损检测模糊模式识别流程

Fig. 1 Flow diagram of the fuzzy pattern recognition for non-destructive testing of wood acoustic

1.1 木材声波无损检测标准类别模式库的建立

采用基于模糊等价关系的传递闭包法对训练样本进行模糊聚类分析,用简单的加权平均法计算该类的标准特征向量来建立标准类别模式库。

1.1.1 信号特征指标选取 对 10 个常用时域特征上升时间、下降时间、平均波峰值、最大幅值、波形平均半高宽度、波形平均全波宽度、均方值、标准偏差、整波个数及峰度系数应用 SPSS 统计分析软件逐一进行了非参数检验和相关性分析,结果表明,波形平均全波宽度、最大幅值、峰度系数及平均波峰值 4 个特征值满足优良特征的 3 个特点,即满足可区别性、可靠性、独立性。共振频率是物理系统的固有属性,且具有区分组间差异的显著特征。

因此,选择信号的共振频率 F_m 、波形平均全波宽度 D_q 、最大幅值 FA 、峰度系数 Hf 及波形平均波峰值 F_q 作为识别特征参数,各参数定义如下:

1) 共振频率(F_m):对采样波形数据进行快速傅立叶变换,其最大幅值所对应的频率即为共振频率。

2) 波形平均全波宽度(D_q): $D_q = \sum_{i=1}^M D_i / M$ (1)

3) 最大幅值(FA): $FA = \max[x(n)]$ (2)

4) 峰度系数(Hf):用来度量数据在中心聚集

程度。 $Hf = \frac{\sum_{n=1}^M [x(n) - \bar{X}]^4}{N \times (\text{Var})^2}$ (3)

5) 波形平均波峰值(F_q): $F_q = \sum_{i=1}^M F_i / M$ (4)

式中, N 为采样点个数, $x(n)$ 为波形采样点幅值, \bar{X} 为 $x(n)$ 的平均值, M 为全波个数, D_i 为第 i 个全波宽度, F_i 为第 i 个波峰值。

1.1.2 训练样本数据规格化 设有 n 个训练样本,训练样本集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,其中元素 x_i 称为训练样本,每个样本有 m 个特性指标,即 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 其中 i 为样本序号; x_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个指标的特征值。于是,得到原始数据矩阵 $X = [x_{ij}]_{n \times m} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 。

样本特征指标数据具有不同的量纲,为了对这些量进行比较,需要对原始数据进行规格化处理。本文采用最为简便的极差值规格化法^[15]对数据进行处理。

极差值规格化可以用公式(5)表示:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}}{\max\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\} - \min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}}$$
 (5)

1.1.3 模糊相似矩阵的建立 为了确定各检测数据之间的亲疏关系,给检测数据中每两组数据都赋以一

相似系数 r_{ij} , $R=[r_{ij}]_{n \times n}$ 为相似矩阵。本文采用距离法计算相似系数,距离法定义如公式(6)所示:

$$r_{ij}=1-c \cdot d(x_i, x_j) \tag{6}$$

式中 c 为适当选取的参数, $d(x_i, x_j)$ 为样本 x_i 到 x_j 的欧氏距离。

1.1.4 模糊聚类 因为矩阵 R 为模糊相似矩阵,一般具有自反性和对称性,不满足传递性,而传递闭包矩阵即模糊等价矩阵需具有传递性,故需对矩阵 R 进行改造^[16]。按照 $R \rightarrow R^2 \rightarrow R^4 \rightarrow \dots \rightarrow R^{2^k} \rightarrow \dots$ 经过有限次运算后,必有 $R^{2^k} = (R^{2^k})^2$, 就可以得到一个传递闭包矩阵 $t(R) = R^{2^k}$ 。

在模糊数学中采用阈值 λ 进行截割,可把等价矩阵 $t(R)$ 转化为 λ -截矩阵 $\lambda[t(R)]$ 。

$$r'_{ij} = \begin{cases} 1 (r_{ij} \geq \lambda) \\ 0 (r_{ij} < \lambda) \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n),$$

其中 r'_{ij} 为普通逻辑矩阵 R 的元素; λ 为截集的阈值。在 $\lambda[t(R)]$ 的各行(列)中 $r'_{ij} = 1$ 的元素归为一类。选取不同的 λ 对训练样本进行动态聚类分析,确定适当的 λ 使其分类结果反映木材损伤的实际情况,此 λ 记为 λ_0 。将分在第 i 类的样本特征向量取加权平均得标准特征向量 $v_i (i = 1, 2, 3)$, 从而建立木材声波无损检测的标准类别模式库。

1.2 模糊模式识别

对待测样本进行识别时,采用与类库相同的特征提取方法提取待测样本特征向量 $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m\}$, 其中 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m$ 为 m 个特征指标。

计算待测样本 \tilde{X} 到标准类别模式库第 i 类特征向量 v_i 的欧氏距离 d_i , 待测样本 \tilde{X} 对标准类库第 i 类的隶属度可以利用式(7)求得:

$$u_i = \left[\sum_{k=1}^3 \left(\frac{d_i}{d_k} \right)^2 \right]^{-1} \quad i = 1, 2, 3 \tag{7}$$

分别计算待测样本对标准类别模式库中标准模式的隶属度,根据最大隶属度原则,待测样本对哪一种模式的隶属度最大,待预测样本即属于哪一种木材试件类别。

2 样本数据采集

2.1 试验材料及仪器

本试验选用的试件为色木(*Acer mono*),规格为 420 mm×60 mm×60 mm 的长方体木块。为了降低木材材质与含水率对试验效果的影响,所选用的色木试件出自同一棵树的心材,同时在实验之前试件均在温度 23℃ 湿度 65% 的恒温恒湿的实验室放置处理一段时间。用所选色木块分别人工制作成未钻孔的标准件、钻末端孔的端部孔试件和钻中间孔

的中间孔试件,孔直径均为 $d = 40$ mm,共 3 个类别,每类各包含 15 个试件,其中 10 个试件作为训练样本数据采集,另外 5 个试件作为待识别样本数据采集,试件结构如图 2 所示。

试验台硬件主要采用 Altera 的 EP3C16 芯片,基于 NIOS 嵌入式系统搭建而成,主要包括:声波信号采集、硬件数据处理、上位机软件 3 部分组成,如图 3 所示。

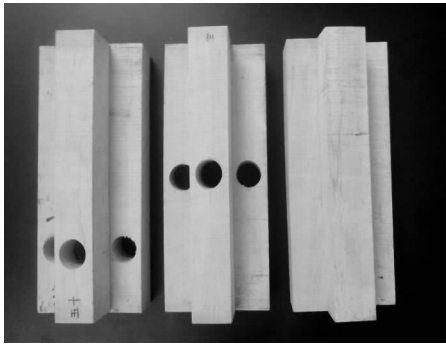


图 2 试件结构示意图
Fig. 2 The diagram of specimen structure



图 3 试验台
Fig. 3 The test bench

2.2 试验方法

在试件的一端用单摆锤敲击试件端面,在试件另一端采用麦克风接收声压信号,声压信号经由硬件数据处理系统传入上位机,在上位机进行时域波形数据记录、存盘。更换试件,以相同的敲击力度重复试验。

2.3 样本数据的采集提取

采用上述试件、仪器及试验方法,对每个试件的声音信号进行采集,并将采集到的数字声音信号波形数据保存为 .dat 文件。取原始声音信号中有效数据的 512 个点来进行分析,其波形图如图 4 所示。

对原始波形数据进行特征提取,提取出特征参数共振频率 Fm 、波形平均全波宽度 Dq 、最大幅值 FA 、峰度系数 Hf 及波形平均波峰值 Fq 作为样本数据。

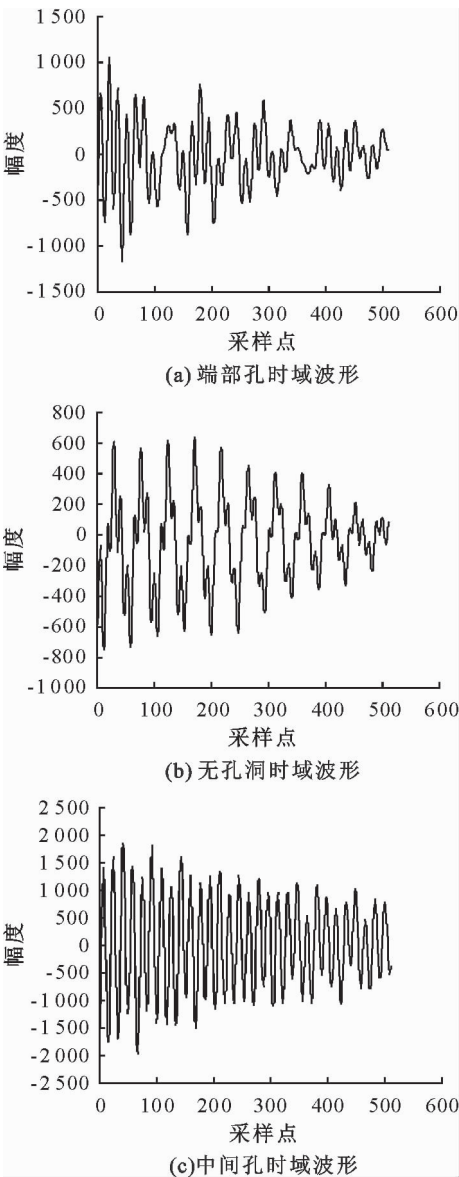


图 4 原始声音信号数据时域波形

Fig. 4 The time domain waveform of the original voice signal data

$$t(R)=\begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.956\ 1 & 0.766\ 2 & 0.935\ 0 & 0.785\ 2 & 0.766\ 2 & 0.785\ 2 \\ 0.956\ 1 & 1.000\ 0 & 0.766\ 2 & 0.935\ 0 & 0.785\ 2 & 0.766\ 2 & 0.785\ 2 \\ 0.766\ 2 & 0.766\ 2 & 1.000\ 0 & 0.766\ 2 & 0.766\ 2 & 0.968\ 8 & 0.766\ 2 \\ 0.935\ 0 & 0.935\ 0 & 0.766\ 2 & 1.000\ 0 & 0.785\ 2 & 0.766\ 2 & 0.785\ 2 \\ 0.785\ 2 & 0.785\ 2 & 0.766\ 2 & 0.785\ 2 & 1.000\ 0 & 0.766\ 2 & 0.963\ 0 \\ 0.766\ 2 & 0.766\ 2 & 0.968\ 8 & 0.766\ 2 & 0.766\ 2 & 1.000\ 0 & 0.766\ 2 \\ 0.785\ 2 & 0.785\ 2 & 0.766\ 2 & 0.785\ 2 & 0.963\ 0 & 0.766\ 2 & 1.000\ 0 \end{bmatrix}$$

取不同的λ值,对矩阵t(R)进行截制作动态聚类,当λ₀=0.935 0时,木材声波信号样本分类符合实际情况,分为3类:一类{x₁,x₂,x₄}为端部孔样本;二类{x₃,x₆}为无孔洞样本;三类{x₅,x₇}为中间孔样本。现取阈值λ=0.935 0,得到λ-截矩阵:

$$[t(R)]_{\lambda=0.935\ 0}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3 试验测试及分析

用单摆小锤敲击端部孔、无孔洞和中间孔试件,经试验台采集木材声波信号,通过比较有孔洞与无孔洞、端部孔与中间孔的声波信号时域曲线和相应的频谱,就可以检测出损伤。通过对木材声波信号的时频特征分析及提取,构建标准类别模式向量及木材声波信号样本特征值的规格化,把木材声波无损检测的问题转化为木材试件样本模糊向量的模式识别问题。

3.1 木材声波信号训练样本的模糊聚类

在采集的木材声波信号训练样本数据中随机选取7组数据作为训练样本进行分析。

1)对样本数据进行规格化处理。

运用极差值法对数据进行规格化处理,得规格化后的样本数据矩阵X'为:

$$X'=\begin{bmatrix} 1.000\ 0 & 0.262\ 4 & 0.373\ 3 & 0.672\ 4 & 0.138\ 9 \\ 1.000\ 0 & 0.390\ 9 & 0.459\ 1 & 0.862\ 4 & 0.173\ 7 \\ 0.000\ 0 & 0.991\ 1 & 0.000\ 0 & 0.321\ 4 & 0.040\ 8 \\ 1.000\ 0 & 0.143\ 0 & 0.250\ 2 & 1.000\ 0 & 0.058\ 9 \\ 0.904\ 8 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.050\ 7 & 0.533\ 4 & 0.000\ 0 \\ 0.904\ 8 & 0.010\ 6 & 0.970\ 4 & 0.099\ 0 & 0.768\ 9 \end{bmatrix}$$

2)求传递闭包,即模糊等价矩阵。

采用欧式距离法进行标定,经计算调整,取c=0.1,能使计算结果在区间[0,1]较好的分散,利用式(2)计算,得模糊相似矩阵R,经3次迭代后(即k=3)矩阵具有传递性,得到传递闭包矩阵t(R):

3)根据传递闭包进行聚类分析,建立标准类别模式库。

上述 3 类样本构成模糊模式库 $\{v_1, v_2, v_3\}$, 其中 v_1 为端部孔样本类别; v_2 为无孔洞样本类别; v_3 为中间孔样本类别。对上述 3 类样本数据分别做简单加权平均得各自的标准指标特征向量, 即对样本 $\{x_1, x_2, x_4\}$ 取加权平均得端部孔类别标准指标特征向量 $\tilde{v}_1 = [3\ 000, 10.655\ 1, 1\ 038, 2.653\ 8, 347.75]$; 对样本 $\{x_3, x_6\}$ 取加权平均得无孔洞类别标准指标特征向量 $\tilde{v}_2 = [1\ 031.3, 16.216, 607.5, 2.158\ 5, 254.14]$; 对样本 $\{x_5, x_7\}$ 取加权平均得中间孔类别标准指标特征向量 $\tilde{v}_3 = [2\ 812.5, 8.673\ 8, 1\ 839, 1.710\ 2, 1\ 036.235]$ 。利用式(1)极差值规格化法对标准指标特征向量 $\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \tilde{v}_3$ 进行规格化处理得标准类别模糊模式库如表 1 所示:

表 1 标准类别模糊模式库

分类	指标特征				
	Fm	Dq	FA	Hf	Fq
端部孔(v_1)	1.000 0	0.262 7	0.349 6	1.000 0	0.119 7
无孔洞(v_2)	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.475 1	0.000 0
中间孔(v_3)	0.904 8	0.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0

3.2 木材声波信号待测样本的模糊模式识别

在采集的待识别样本中随机选取 5 组数据作为待测样本进行模糊模式识别, 待测样本指标数据 $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \tilde{x}_4, \tilde{x}_5)$, 为了便于计算隶属度, 将待测样本指标数据规格化, 结果见表 2。

表 2 待测样本指标规格化后的数据

待测样本	指标特征				
	Fm	Dq	FA	Hf	Fq
\tilde{x}_1	1.000 0	0.529 7	0.142 4	0.896 6	0.055 8
\tilde{x}_2	0.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0
\tilde{x}_3	0.904 8	0.085 9	1.000 0	0.156 1	1.000 0
\tilde{x}_4	0.904 8	0.000 0	0.811 1	0.000 0	0.947 0
\tilde{x}_5	1.000 0	0.175 9	0.163 3	0.698 2	0.114 4

由式(3)分别计算得 $u(\tilde{x}_1, v_1) = 0.878\ 6, u(\tilde{x}_1, v_2) = 0.079\ 7, u(\tilde{x}_1, v_3) = 0.041\ 7$, 因为 $u(\tilde{x}_1, v_1) = 0.878\ 6$ 最大, 根据最大隶属原则, \tilde{x}_1 被识别为第 1 类, 端部孔样本。同理计算, $u(\tilde{x}_2, v_1) = 0.134\ 3, u(\tilde{x}_2, v_2) = 0.818\ 9, u(\tilde{x}_2, v_3) = 0.046\ 8$, 其中 $u(\tilde{x}_2, v_2) = 0.818\ 9$ 最大, 所以 \tilde{x}_2 被识别为第 2 类, 无孔洞样本。以此类推, 分别计算 $\tilde{x}_3, \tilde{x}_4, \tilde{x}_5$ 对 v_1, v_2, v_3 的隶属度, 并根据最大隶属原则进行识别, 计算及识别结果见表 3。

从表 3 中可以看出, 待测样本 \tilde{x}_1, \tilde{x}_5 属于第 1 类, 为端部孔样本; \tilde{x}_2 属于第 2 类, 无孔洞样本; \tilde{x}_3, \tilde{x}_4 属于第 3 类, 中间孔样本。此结论与实际情况相符, 表明本文建立的模糊模式识别模型适用于色木

孔洞缺陷位置的无损检测。

表 3 待测样本的模糊模式识别结果

Table 3 The fuzzy pattern recognition results of sample under test

待测样本	隶属度			最大隶属度	所属类
	u_1	u_2	u_3		
\tilde{x}_1	0.878 6	0.079 7	0.041 7	u_1	第 1 类
\tilde{x}_2	0.134 3	0.818 9	0.046 8	u_2	第 2 类
\tilde{x}_3	0.015 9	0.008 2	0.975 9	u_3	第 3 类
\tilde{x}_4	0.018 9	0.010 4	0.970 7	u_3	第 3 类
\tilde{x}_5	0.875 9	0.066 0	0.058 1	u_1	第 1 类

表中: u_i 为待测样本对第 i 类模式的隶属度, $i=1, 2, 3$ 。

3.3 准确度检验

按照 2.2、2.3 的采集提取数据的方法, 共采集 300 组待识别样本数据, 每个试件各采集 20 组, 作为本文模式识别模型准确度检验的数据样本。

首先用极差值法对样本数据进行规格化处理, 然后采用 3.1 所建立的标准类别模糊模式库以及式(3)计算隶属度, 应用最大隶属度原则划分归属类别, 结果表明: 端部孔样本中有 16 个没有正确归类, 准确率为 84%; 无孔洞样本中有 6 个没有正确归类, 准确率为 94%; 中间孔样本中有 8 个没有正确归类, 准确率为 92%。

4 结论与讨论

本研究建立了基于模糊聚类分析的模糊模式识别色木孔洞缺陷位置无损检测模型, 为木材缺陷的无损检测提供了新的思路和方法, 详细介绍了该模糊模式识别模型建立的具体步骤, 结合试验数据, 验证了该模型的可行性、准确性。

分析木材声波信号的时域特性和频谱特性提取出共振频率、波形平均全波宽度、最大幅值、峰度系数及波形平均波峰值 5 个特征值, 试验结果表明, 这 5 个特征值对分析色木孔洞缺陷位置声波信号可行、有效。

建立的色木孔洞缺陷位置无损检测模糊模式识别模型简易灵巧, 适用于色木孔洞缺陷位置的无损检测, 检测准确率较高, 端部孔、无孔洞和中间孔试件样本的平均检测准确率可达 90%。

本试验仅仅研究了一定大小孔洞在试件不同位置的模糊模式识别, 但是不同的树种及含水率对模糊模式识别模型的建立有什么样的影响, 该模型是否能够定量检测木材孔洞缺陷的大小, 以及是否能够应用于木材其他形式内部缺陷的无损检测还需要做进一步的探讨和研究。

参考文献:

[1] 孟令联, 赵钟声, 刘一星. 木材无损检测技术及其应用与展望[J]. 林业机械与木工设备, 2001, 29(9): 4-6.

[2] 管珣,赵茂程.北美基于应力波技术的木材测试及应力分等的研究进展[J].西北林学院学报,2013,28(2):178-181.
GUAN X,ZHAO M C. Advances in the researches of the wood quality testing and stress grading based on the acoustic technology in North America[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(2):178-181. (in Chinese)

[3] NELED B, SCHOTTE S, LAMMERTYN J, *et al.* Firmness changes of pear fruit before and harvest with the acoustic impulse response technique[J]. J. Agri. Engin. Res. , 2000,77(2):183-191.

[4] DIEZMA-LGLESIAS B, RUIA-ALTISENTM, BARREIRO P. Detection of internal quality in seedless watermelon by a-coustic impulse response[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(2):221-230.

[5] CHO H K, W K. Choi factors affecting acoustic responses of egg[C]//Proc Int Symp on Agricultural Mechanization and Automation in Taiwan,1997:215-220.

[6] CHO H K, W K. Detection of surface in shell eggs by acoustic impulse method [J]. Transactions of ASAE, 2000, 43(6): 1921-1926.

[7] 段新芳,王平,周冠武,等.应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究[J].西北林学院学报,2007,22(1):112-114.
DUAN X F,WANG P,ZHOU G W,*et al.* Nondestructive e-valuation of dynamic MOE of ancient wooden structure mem-bers by stress wave method[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(1):112-114. (in Chinese)

[8] 王宇.管材缺陷的模糊模式识别方法的研究[D].长春:吉林大学硕士论文,2005.

[9] 谭冬梅,瞿伟廉.基于提升小波包和模糊模式识别的结构损伤识别[J].噪声与振动控制,2011(2):84-88.
TAN D M,QU W L. Damage identification of structure based on lifting wavelet packet and fuzzy pattern recognition[J]. Noise and Vibration Conrol,2011(2):84-88. (in Chinese)

[10] CAWLEY P, ADAMS R D. The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing[J]. Journal of Sound and Vibration,1988,122 :299-316.

[11] 于鸣,任洪娥,常春媛.木材强度无损检测的音频信号分析[J].木材加工机械,2006,17(3):28-33.
YU M,REN H E,CHANG C Y. Audio signal analysis of non-destructive test in wood intensity[J]. Wood Processing Machinery,2006,17(3):28-33. (in Chinese)

[12] 方昱,邢涛,王立海,等.基于声波的木材孔洞位置检测的探讨[J].森林工程,2010,26(5):21-24.
FANG Y,XING T,WANG L H,*et al.* Discussion on hole’s position detection inside of wood based on acoustic wave[J]. Forest Engineering,2010,26(5):21-24.

[13] 吴从清,王朝军.岩石声波检测的结构面分析方法[J].爆破,2007,17(Supp.1):24-27.
WU C Q,WANG C J. Method of sonic velocity testing in rock with structure profile analysing[J]. Blasting,2007,17(Supp.1):24-27. (in Chinese)

[14] 邬冠华,林俊明,任吉林,等.声振检测方法的发展[J].无损检测,2011,33(2):35-40.
WU G H,LIN J M,REN J L,*et al.* Evolution of acoustic im-pact testing method[J]. Nondestructive Testiing,2011,33(2):35-40. (in Chinese)

[15] 马光志,倪国元.一种增量式模糊聚类算法[J].微计算机应用,2005,26(1):5-7.
MA G Z,NI G Y. An increasable fuzzy clustering algorithm [J]. Microcomputer Applications,2005,26(1):5-7. (in Chi-nese)

[16] 陈守煜,袁晶瑄,李亚伟.基于可变模糊集的模糊聚类迭代模型及其应用[J].大连理工大学学报,2008,48(6):881-886.
CHEN S Y,YUAN J X,LI Y W. Fuzzy clustering iterative model and its application based on variable fuzzy set[J]. Jour-nal of Dalian University of Technology,2008,48(6):881-886. (in Chinese)